西北干旱半干旱区NDVI季节性变化及其影响因素

吴万民[1]， 刘 涛[2]， 陈 鑫[2]

（1. 成都信息工程大学资源与环境学院，四川 成都 610225；2. 清华大学全球变化研究中心地球系统科学系，地球系统模拟教育部重点实验室，北京 100084）

摘 要：研究植被的动态变化及其影响因素，不仅能够揭示植被覆盖动态变化特征与气候变化之间的响应机制，同时对区域的植被恢复以及生态可持续具有重要意义。本文基于MODIS遥感卫星数据，借助变异系数、趋势分析、相关分析与Hurst指数探究了2000—2020年西北干旱半干旱区植被覆盖逐季变化特征、影响因素及未来趋势。结果表明：（1）归一化植被指数（Normalized Difference Vegetation Index, NDVI）空间变异程度在冬季偏高，且高波动主要分布在新疆与内蒙古大兴安岭的草地与未利用地区域。（2）NDVI随季节波动较大，在林地与耕地最为明显。（3）NDVI主要为改善趋势，其中，春季改善面积最大（84.63%），冬季最小（72.52%），且林地改善最为显著。（4）各季度NDVI均受地表温度与降水量影响（Significance=0.05），且夏季地表温度与冬季降水量逐年递增对植被生长具有抑制作用。（5）未来NDVI主要呈改善趋势。值得注意的是，退化区域零星分布于新疆塔里木盆地、准噶尔盆地等地区。本研究旨在为西北干旱半干旱区的生态修复与治理，以及局部气候暖湿化的应对提供理论参考。

关键词：NDVI；植被变化趋势；影响因素；MODIS；未来预测；干旱半干旱区；西北

植被作为生态系统的初级生产者，其不仅对全球气候变化[1]、生态系统间的物质交换、能量传输及生态环境变化具有重要作用[2-3]，同时，也对区域农业生产、水土保持、自然灾害保护以及人类可持续发展具有重要影响[4]。自21世纪以来，中国政府高度重视植被对于中国可持续发展与生态文明建设的重要性[5]。因此，中国实施开展多项生态修复举措，以期持续的提升中国植被覆盖水平。据中国林业和草原局发布的相关报告表明，中国森林覆盖率由2000年的18.21%增加至2022年的24.02%[6]。特别是在中国干旱区与半干旱区，退耕还林/还草、三北防护林等生态修复政策的实施[7-8]，不仅极大的提升了该区域植被覆盖水平，同时对于该区域防风固沙、防止水土流失以及人类福祉提升具有重要意义。

归一化植被指数NDVI（Normalized Difference Vegetation Index）为植被量化指标，不仅能够良好的反映植被生产力、植被覆盖分布情况，同时也能对区域实施多时段的植被监测[9-10]。国内外众多学者已经对不同地区NDVI的时空变化趋势及影响因素进行了研究。研究表明，NDVI下降区域主要分布在高海拔地区[11]；NDVI与降水和气温相关关系呈现出明显的地域差异[12]；温度、降水对NDVI的影响可持续时间明显多于日照时数[13]；NDVI变化模式由非单调行为解释[14]；植被生长模式显示出剧烈的季节循环和年际变化[15]；NDVI与降水和温度之间有1~2个月的滞后[16]。西北干旱半干旱区是中国生态修复主要区域之一，较多学者开展了广泛的植被观测相关研究。如依明阿力木等[9]研究了近20 a喀什地区植被覆盖时空变化及其影响因素；石淞等[17]探究了2000—2020年大兴安岭林草交错带NDVI时空演变与定量归因；陈春波等[18]探讨了1981—2020年昆仑山-阿尔金山草地NDVI时空变化及其对气温、降水的响应；方贺等[19]探究了阿克苏地区植被生态质量时空变化及其驱动机制。

以上大多研究中，均以年为时间分辨率探讨NDVI的变化趋势与影响因素。由于西北干旱与半干旱区冬季积雪覆盖或者无植被，NDVI算法本身

收稿日期：2023-05-24； **修订日期**：2023-08-25
基金项目：国家自然科学基金青年科学基金（42201279）；中国博士后科学基金（2022M711755）
作者简介：吴万民（2002-），男，主要从事遥感植被监测研究. E-mail: 17208281794@163.com
通讯作者：刘涛. E-mail: liut22@mails.tsinghua.edu.cn

可能会存在对植被低值高估的现象[10]；其次，西北干旱半干旱区的植被覆盖受到气候、土地利用和人类活动等多种因素的影响，呈现出一定的季节性变化特征。因此，有必要逐季度对于西北干旱半干旱区植被覆盖变化趋势与影响因素进行更加系统的研究。

鉴于此，本文探究了2000—2020年西北干旱半干旱区各季度NDVI的时空变化、影响因素及其未来趋势。以期对西北干旱半干旱区的生态修复与治理以及局部气候暖湿化的应对提供理论参考。

1 研究区概况

中国西北干旱半干旱区位于大兴安岭以西，青藏高原和黄土高原以北内陆地区（图1），在34°7.2′~53°19.8′N，73°30′~125°19.2′E之间，地域辽阔，面积占全国陆地的30%，包含了新疆、甘肃西北部、宁夏、内蒙古西部4个地区；属于干旱和半干旱的温带大陆性气候，冬冷夏热，年温差、日温差大，年平均气温在0~16 ℃之间，且空间分布差异较大，干旱少雨，年降水量东部在400 mm左右，西部则减少到100 mm以下，多大风天气，地表以荒漠、荒漠草原为主，植被的分布依次为典型干草原、荒漠草原、荒漠。由于深处于大陆内部，且气候干旱、风力强劲、植被稀少、流水作用弱时常会伴有耕地退化、草地退化、林地退化等荒漠化现象发生[20-22]。

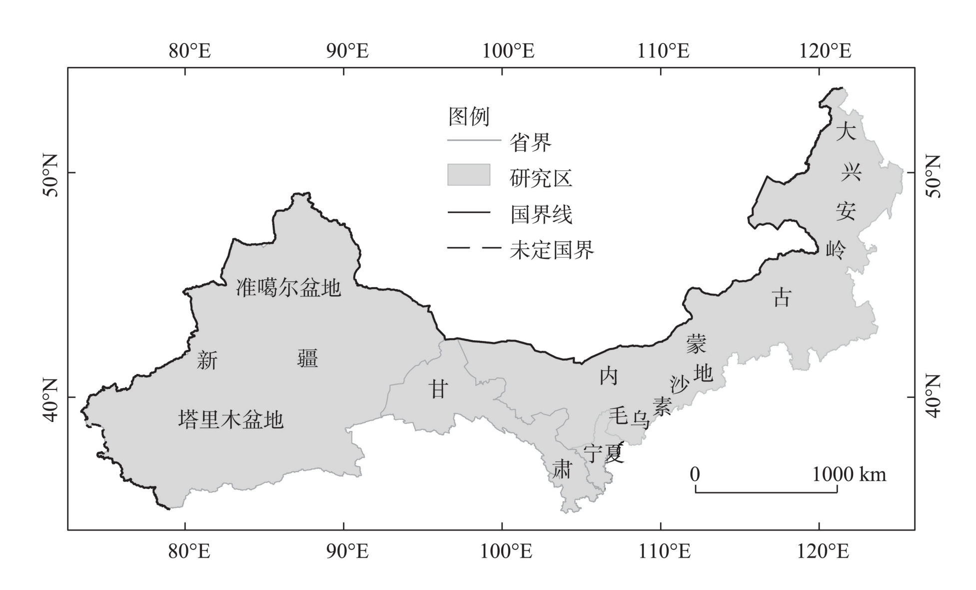
2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本文研究主要利用MODIS数据，包括地表温度LST与NDVI数据，研究区有12个MODIS分块；以及精度更高的GPM降水卫星数据，以上数据均来自earth- data（https://search.earthdata.nasa.gov/search）；研究区与土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)。季节按气象标准进行划分[10]。

2.1.1 *NDVI与LST数据* NDVI(MOD13A2)与地表温度数据集(MOD11A1)空间分辨率为1 km，时间分辨率为8 d；对其进行批量辐射校正、几何校正、去除填充值、拼接、重投影、均值计算与裁剪得到研究区2000—2020年各季度1 km分辨率的LST、NDVI栅格数据集。考虑到研究区冬季的积雪覆盖或者无植被情况，最后将冬季NDVI小于0.05的像元剔除。

2.1.2 *GPM降水卫星数据* GPM降水卫星于2014年2月28日发射成功以获得更高精度的降水数据[23]，覆盖范围为60°S~60°N。通过整理合成前期数据，其提供了2014年以前的降水数据。本文使用的2000—2020年降水数据(GPM_3IMERGM)空间分辨率为0.1°，时间分辨率为1月。通过批量预处理、重投影、裁剪、季度累积与克里金插值得到各季度1 km分辨率降水数据。



注：底图采用自然资源部标准地图制作，审图号为GS(2020)4619号，对底图边界无修改。下同。

图1 研究区示意图

Fig. 1 Diagram of the study area

2.1.3 土地利用数据　土地利用数据空间分辨率为1 km，经过重投影与裁剪得到研究区2000年、2005年、2010年、2015年与2020年土地利用类型数据。根据6种土地利用类型（耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地）进行制图（图2）。

2.2 研究方法

2.2.1 变异系数计算　利用变异系数衡量NDVI变异程度[12,24–25]，反映2000—2020年西北干旱半干旱区NDVI波动程度。其计算公式如下[26]：

$$C_v = \frac{P_Q}{P} \times 100\% \tag{1}$$

式中：C_v 为NDVI的变异系数；P_Q 为NDVI的标准偏差；P 为NDVI的平均值；利用自然断点法将变异系数分为5类[24]。

2.2.2 Theil-Sen趋势分析与Mann-Kendall显著性检验　使用广泛用于植被长时间序列分析中的Theil-Sen趋势分析与Mann-Kendall显著性检验相结合[27]，探究西北干旱半干旱区植被变化趋势，可以减少数据中出现异常值的影响，使得结果更为科学可信[28]。Theil-Sen计算公式为：

$$S_{NDVI} = \mathrm{median}\left(\frac{NDVI_i - NDVI_j}{i-j}\right), \quad 2000 \leqslant i < j \leqslant 2020 \tag{2}$$

式中：$NDVI_i$、$NDVI_j$表示对应像元第i、j年各季节的NDVI值；i、j为对应的年份；median为求中位数函数；当$S_{NDVI}>0$，表示此像元NDVI呈现上升趋势，反之则相反。通过Mann-Kendall检验[29]对变化趋势的显著性进行检验。最后将变化趋势按表1分为6类[30]。（表1）

2.2.3 皮尔逊相关分析　应用皮尔逊系数估算降水量、地表温度与NDVI的相关性，从而分析气候因素对NDVI的影响。计算公式如下[31]：

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}} \tag{3}$$

式中：n为时间序列总数；x_i、y_i为对应时间序列的值；$\bar{x}$、$\bar{y}$为多年时间序列均值。r值为两变量间的相关性[32]，其值越大，代表相关性越好，反之则代表相关性越差。

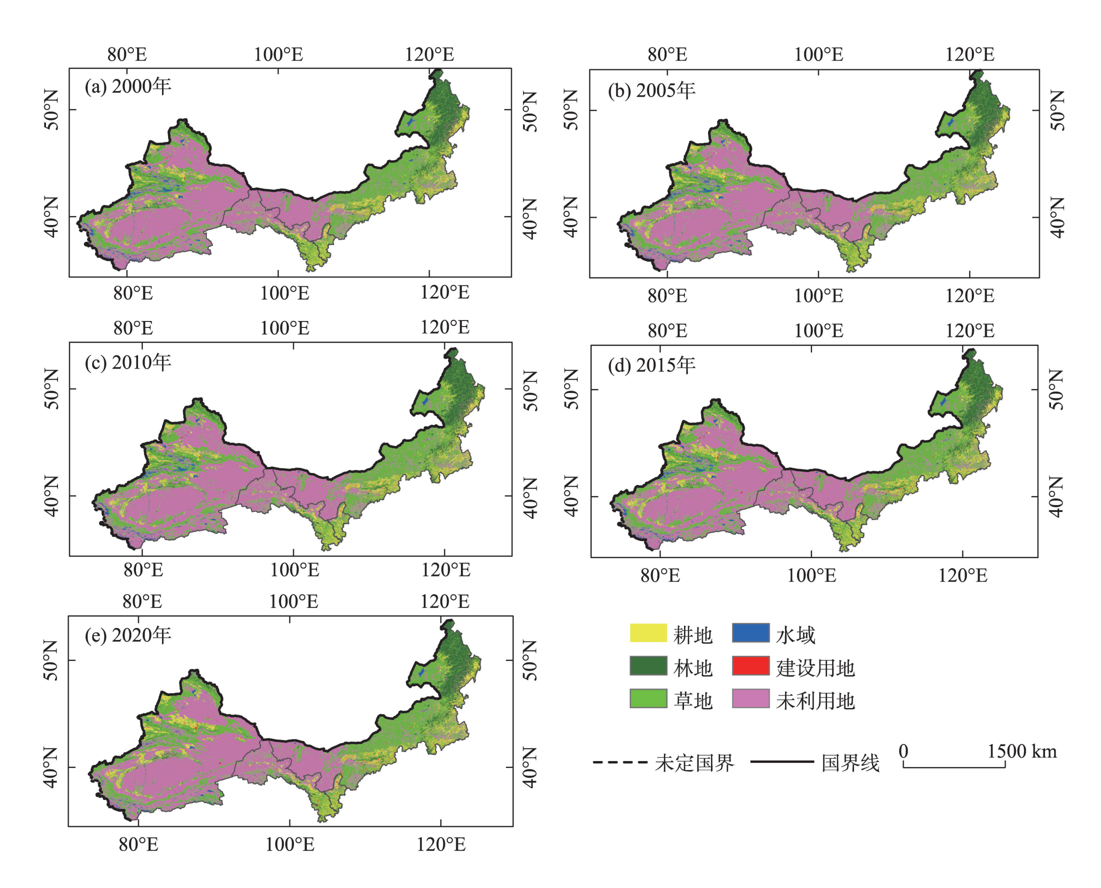


图2　2000—2020年西北干旱半干旱区土地利用空间分布

Fig. 2　Spatial distribution of land use in the arid and semi-arid regions of Northwest China from 2000 to 2020

表1 Theil-Sen Median趋势分析、Mann-Kendall显著性检验分类

Tab. 1 Theil-Sen Median trend analysis, Mann-Kendall significance test classification

S_{NDVI}	|Z|	变化趋势
S>0	|Z|≥ 2.58	极显著改善
S>0	1.96≤ |Z|<2.58	显著改善
S>0	|Z|<1.96	不显著改善
S<0	|Z| ≥2.58	极显著退化
S<0	1.96 ≤|Z|<2.58	显著退化
S<0	|Z|<1.96	不显著退化

2.2.4 Hurst指数分析 表征时间序列持续性的Hurst指数重标度极差分析法[33]，已大量应用在NDVI未来趋势预测[11,24,34]，本文用其对西北干旱半干旱区未来NDVI变化趋势进行预测。重标度极差分析法首先对数据进行分组，然后对每组数据进行包括标准差S、累计均值离差$X_{a,k}$和极差R计算，公式如下：

$$S=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}(P_{a,k}-\bar{O})\hat{}2} \quad (4)$$

$$X_{a,k}=\sum_{i=1}^{k}(P_{a,i}-\bar{O}) \quad (5)$$

$$R=\max_{1\leqslant k\leqslant n}(X_{a,k})-\min_{1\leqslant k\leqslant n}(X_{a,k}) \quad (6)$$

式中：$\bar{O}$为子区间均值；$P_{a,k}$与$P_{a,i}$为子区间每个元素，然后计算每个子区间的重标度极差(Ri/Si)，取平均得到(R/S)，改变子区间长度，重新分组计算得到重标度极差均值$(R/S)n$。最后将$(R/S)n$与对应子区间长度两边取对数，进行最小二乘拟合，得到斜率H即为Hurst指数[35]。

当Hurst指数等于0.5，则不存在长时间序列变化规律性；当Hurst指数小于0.5，则时间序列表现出反持续性，一般只能预测未来几个时间点的数据；反之相反[33]。

3 结果与分析

3.1 2000—2020年西北干旱半干旱区NDVI空间分布

由图3可知，未利用地NDVI季节差异小植被长势差，NDVI均在0~0.2之间；草地在夏季长势最好，春秋两季有所退化，冬季长势最差，NDVI均小于0.2；耕地NDVI季节差异明显，冬季NDVI小于0.2，春秋两季NDVI在0.2~0.4之间，夏季NDVI大于0.4，其与人类种植活动高度相关；林地季节波动较大，在夏季长势最好，NDVI在0.8~1之间，春秋两季有所退化，冬季长势最差NDVI普遍小于0.40。

3.2 2000—2020年西北干旱半干旱区NDVI变异程度

由图4和图5可以看出，各季节NDVI均以低波动为主，春夏秋季低波动面积占比均大于90%，冬季占71%。春夏秋季波动区域较大的面积占比均小于2%；由于冬季风力较大、低温干燥、土壤质地差与水分不足增加了冬季植被的波动性，主要体现在新疆与内蒙古大兴安岭地区，且波动较大区域多发生在草地与未利用地区域。同时，干旱半干旱区干旱年与多雨年的交替出现、干旱季节与雨季季节的较大差异，加上年度降水量的波动较大，导致年度NDVI总体波动较季度更大。

3.3 2000—2020年西北干旱半干旱区NDVI时空变化

通过NDVI年度与季度变化趋势监测相结合，可以提供更加精确的信息，从而更好地把握植被的动态变化，为管理决策提供更有针对性的支持。图6e反映了植被整体的变化趋势，相较于季度，NDVI改善区域更广，退化区域更窄。其中，各季度NDVI均以改善为主，在甘肃省南部、宁夏北部与内蒙古黄河流域改善趋势最为明显，且主要集中在林地区域（图2），但季节差异明显（图7），夏季面积最广占比为46.73%，冬季最少为32.64%，春秋两季次之。植被退化区域由春、夏、秋、冬逐季递增，轻微退化主要在部分草地区域，严重退化区域主要集中在内蒙古大兴安岭、甘肃库姆塔格沙漠与马鬃山附近未利用地区域。

图8中线性方程表示各季度NDVI逐年变化率，可见，四季NDVI均为增长趋势，其中，夏季增长速率最快为0.0059·a^{-1}，NDVI均值在0.65~0.83之间波动；冬季增长速率最慢为0.0019·a^{-1}，NDVI均值在0.25~0.33之间波动，春秋两季次之。

3.4 NDVI与气候要素的关系

春、夏、秋季节NDVI与降水量主要为正相关，冬季主要为负相关（图9），可见，冬季降水量的增加对于植被生长具有抑制作用。

由图10可知，显著正相关区域在夏季占比最高，为40.4%，主要分布在内蒙古与甘肃省南部区域，在春、秋、冬季显著正相关区域逐渐递减；显著

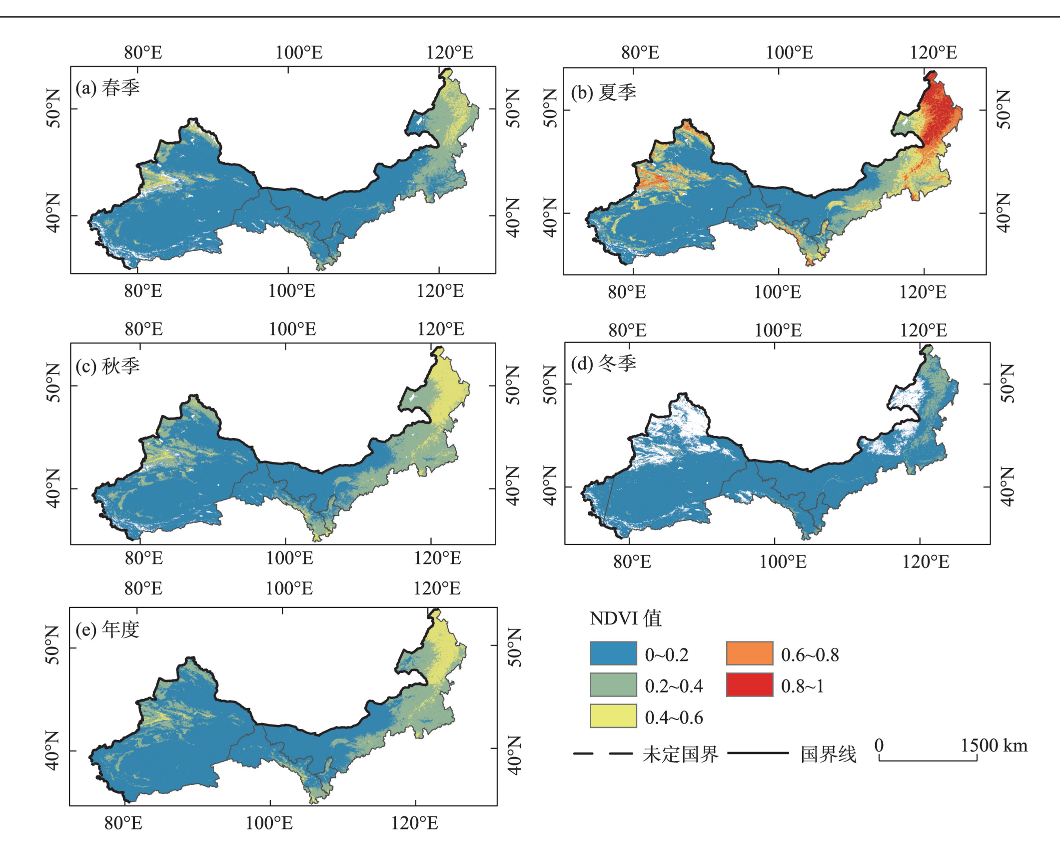


图3　2000—2020年西北干旱半干旱区NDVI季均与年均空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of NDVI seasonal and annual averages in the arid and semi-arid regions of Northwest China from 2000 to 2020

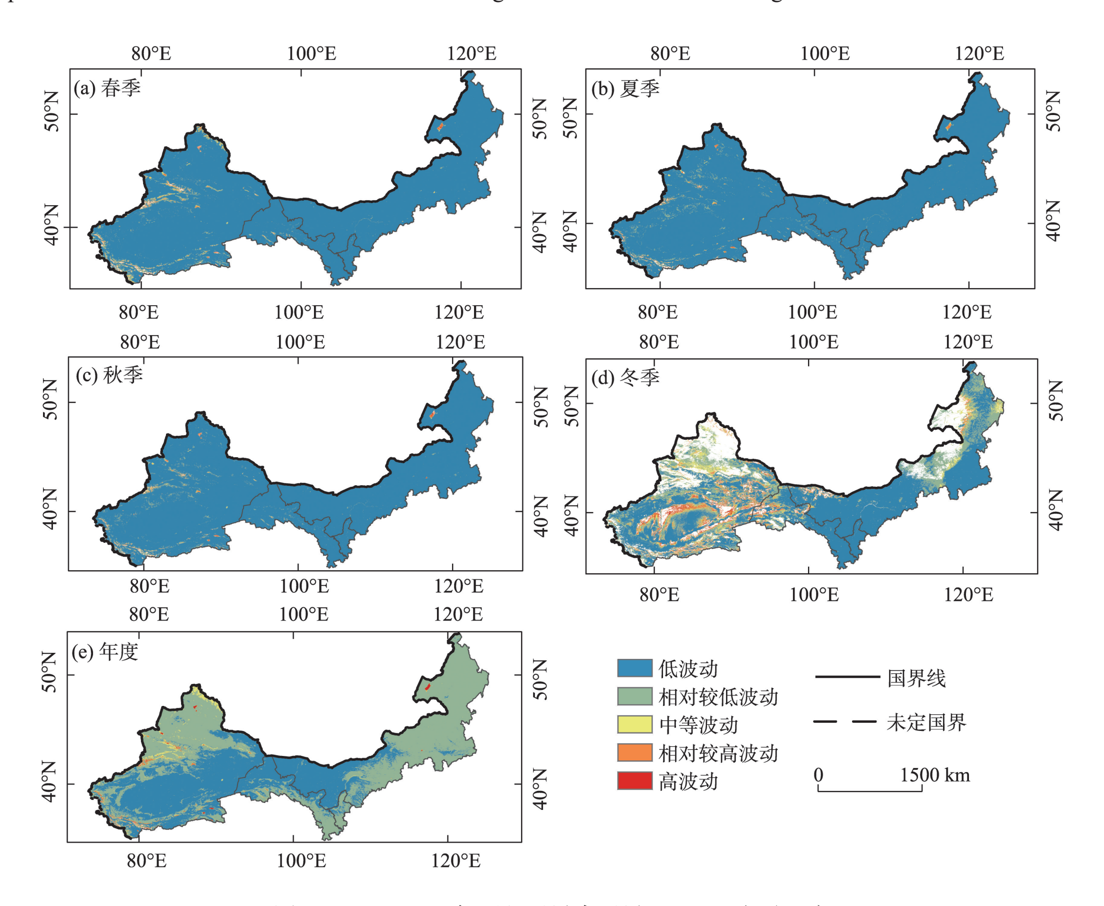


图4　2000—2020年西北干旱半干旱区NDVI变异程度

Fig. 4　Levels of NDVI variability in the arid and semi-arid regions of Northwest China from 2000 to 2020

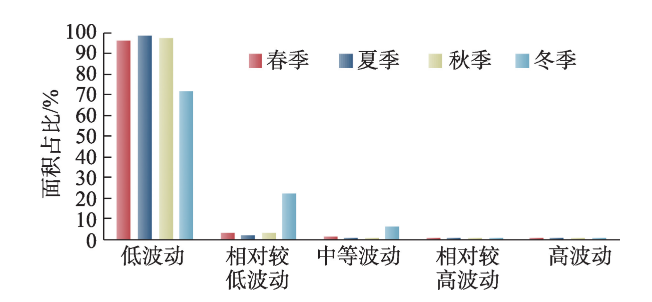


图5 2000—2020年西北干旱半干旱区各季节波动程度面积占比

Fig. 5 Area share of each seasonal fluctuation degree in the arid and semi-arid regions of Northwest China from 2000 to 2020

负相关区域主要分布在内蒙古大兴安岭北部，且在冬季面积占比最大，为8.5%，夏季最小，为0.73%，春秋两季次之。微弱相关区域在冬季分布最广，秋、春、夏季逐渐递减。

由图11可以看出，NDVI与地表温度相关程度季节分异较大，春、秋、冬季NDVI与地表温度主要为正相关，夏季主要为负相关。

NDVI与地表温度呈现显著负相关在夏季最为明显（图12），其面积占比为14.2%，主要分布在内蒙古高原、呼伦贝尔市、西辽河平原与新疆昆仑山附近；春冬两季以显著正相关为主，其面积分别占15.5%与14%，主要分布在内蒙古最北端与呼和浩特市附近；秋季NDVI与地表温度主要为微弱相关，面积占比92.8%。

综上所述，结合图8结果显示，夏季植被的长势最好，NDVI平均值为0.75，同时，植被增长速率最快为0.0059·a^{-1}，虽然，夏季温度的逐年递增趋势对植被生长具有抑制作用，但降雨量的大幅上升，使得植被生长稳定且改善明显；冬季植被长势最差，NDVI平均值为0.28，NDVI增长速率最慢为0.0019·a^{-1}，即使冬季地表温度有所回升，但降雨量的增加抑制植被生长更显著，使得植被生长不稳定。

3.5 NDVI未来变化趋势

由图13、表2、表3可以看出，采用Hurst指数对西北干旱半干旱区未来变化趋势预测主要为长期预测；短期预测主要分布在内蒙古呼伦贝尔市与大兴安岭，其面积占比为35.29%。未来NDVI主要呈改善趋势，面积占比为70.89%，以显著改善为主占

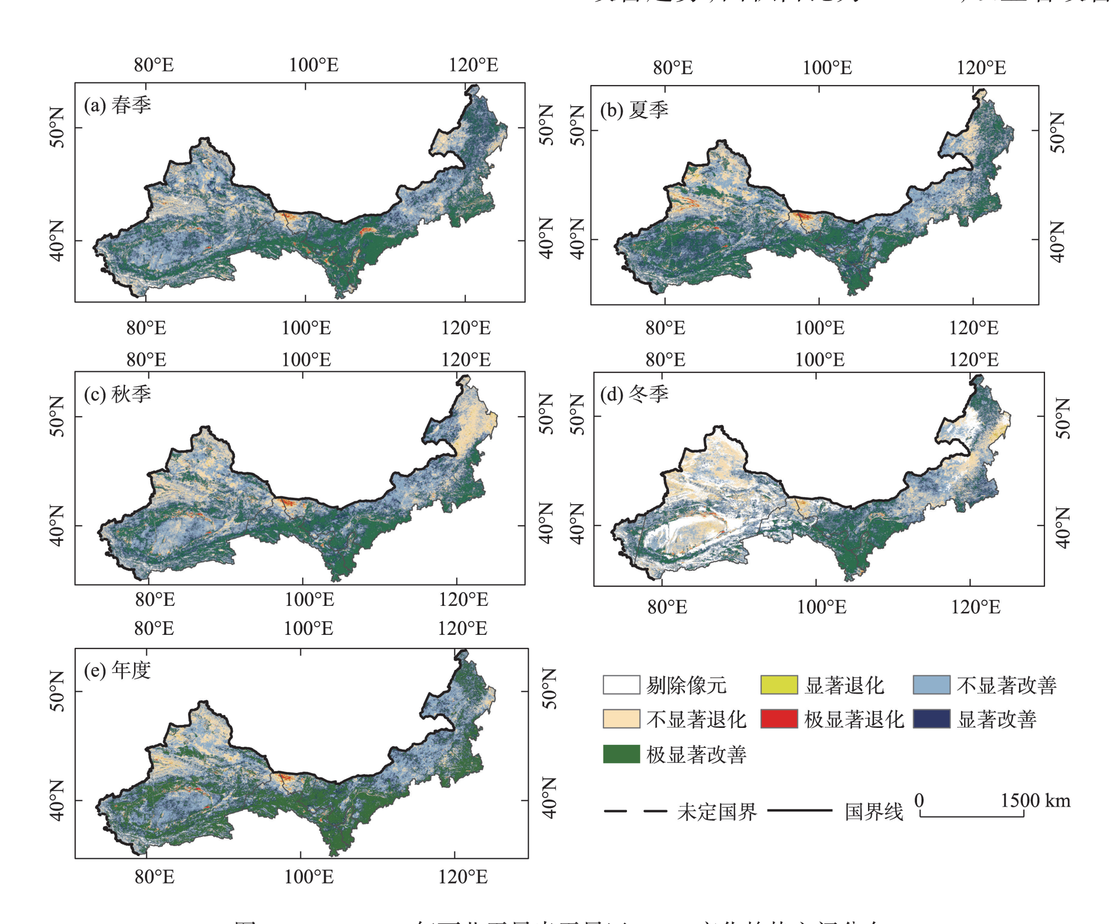


图6 2000—2020年西北干旱半干旱区NDVI变化趋势空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of NDVI change trends in the arid and semi-arid regions of Northwest China from 2000 to 2020

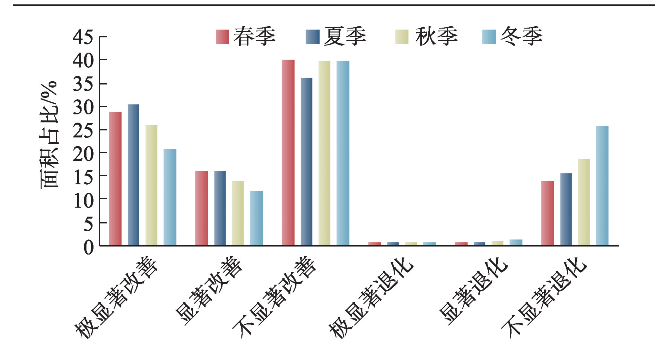


图7　2000—2020年西北干旱半干旱区NDVI各季节变化趋势面积占比

Fig. 7　Area share of NDVI trends by season in the arid and semi-arid regions of the Northwest China from 2000 to 2020

比39.03%，主要分布在新疆天山、昆仑山，甘肃省兰州市、酒泉市，宁夏六盘山、黄土高原与内蒙古毛乌素沙地等地区。未来NDVI退化区域有所增加，其中，严重退化区域占11.7%，主要分布在内蒙古大兴安岭、甘肃库姆塔格沙漠与马鬃山附近；轻微退化占比17.41%，主要分布在新疆塔里木盆地、准噶尔盆地、内蒙古高原、呼伦贝尔高原与浑善达克沙地。

4　讨 论

本研究发现，2000—2020年西北干旱半干旱区NDVI整体为微波动增长趋势，与已有研究保持一

图8　2000—2020年西北干旱半干旱区各季度NDVI、LST、降水量变化趋势与NDVI变化率

Fig. 8　Trends in NDVI, LST, precipitation and NDVI change rates by season in the arid and semi-arid regions of Northwest China from 2000 to 2020

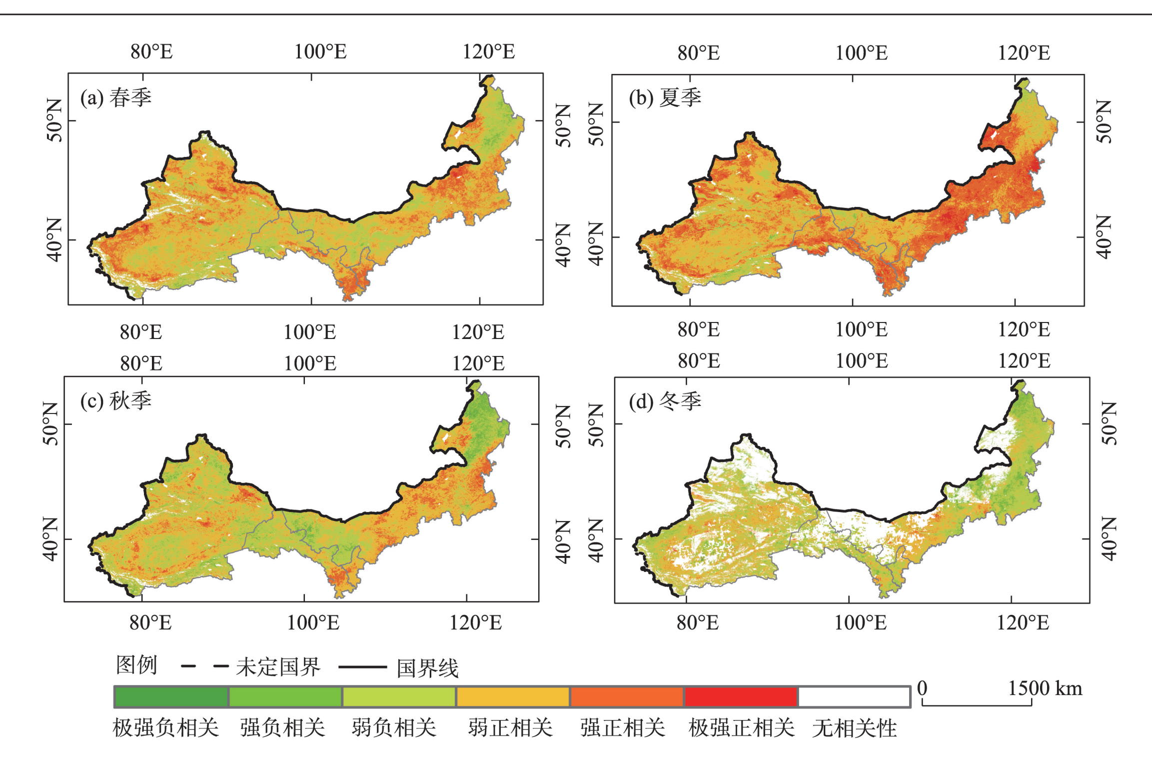


图9 2000—2020年西北干旱半干旱区各季节NDVI与降水量相关程度空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of the correlation between NDVI and precipitation by season in the arid and semi-arid regions of Northwest China from 2000 to 2020

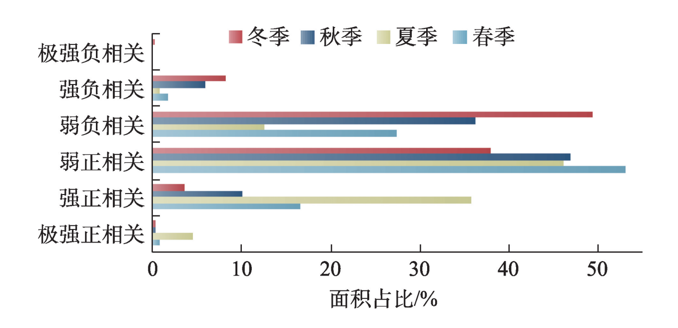


图10 2000—2020年西北干旱半干旱区各季节NDVI与降水量相关程度面积占比

Fig. 10 Area share of NDVI in relation to precipitation by season in the arid and semi-arid regions of Northwest China from 2000 to 2020

致[36-38]，表明近年我国一系列生态环境改善措施取得了显著成效[39-40]。但各季度存在差异，首先，空间上，春季改善面积为84.63%、夏季为82.95%、秋季为79.79%、冬季为72.52%；时间上，NDVI增长速率夏季为0.0059·a^{-1}、秋季为0.0038·a^{-1}、春季为0.003·a^{-1}、冬季为0.0019·a^{-1}；且冬季波动程度高于其他季节。其次，林地、耕地与草地NDVI随季节波动较大，夏季达到峰值，冬季退化严重，耕地NDVI变化与人类春种秋收种植活动相吻合，林地与草地同各季节气候差异相适应。另外，地表温度逐年递增，春秋冬季促进植被生长，夏季抑制植被生长；降水量逐年递增，春夏秋季促进植被生长，冬季抑制植被生长，这与已有研究，植被同降水量与气温呈正相关关系[4,9]存在一定差异。主要原因是，夏季高温环境促进了植被蒸腾作用同时抑制了光合作用，使得夏季地表温度与植被呈负相关关系，同时，冬季降水导致土壤湿度过高、低温环境、养分流失和病害滋生等不利因素存在，使得冬季植被与降水量呈负相关关系。

研究还发现，退化区域面积冬季明显高于其他季节，且主要集中在大兴安岭、呼伦贝尔高原、马鬃山附近与准噶尔盆地等草地区域，可见，冬季的气候条件对于草地不利影响逐年递增，这与已有研究相吻合[41-42]。西北干旱半干旱区本身气候不利因素影响严重，加之人类活动过度集中砍伐，为NDVI退化的主要原因[43]。未来NDVI退化区域有所增加，这主要由于西北干旱半干旱区推广种植的抗旱树种，种类较为单一，不利于可持续性生态环境发展[43-44]。

本研究还存在一定局限性，比如本文选取1 km分辨率数据进行探究，导致在城市与水体区域出现对植被低值高估的情况；其次，NDVI表征植被变化

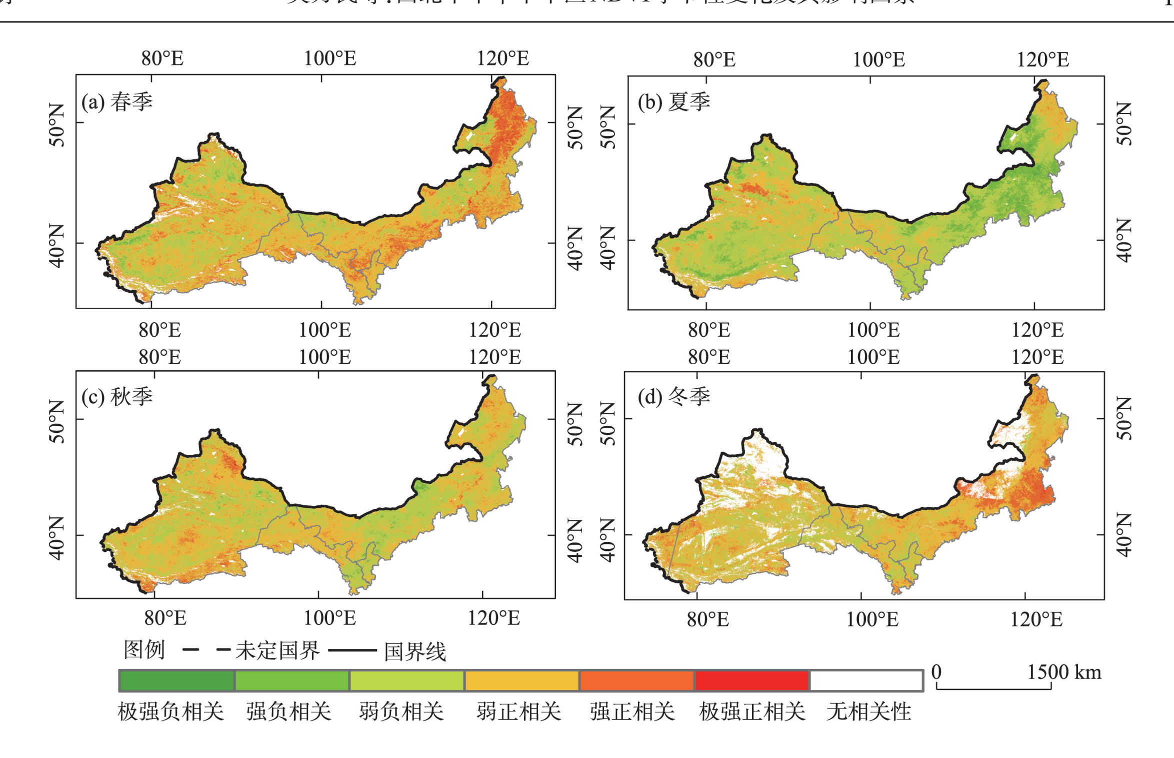


图11 2000—2020年西北干旱半干旱区各季节NDVI与地表温度相关程度空间分布

Fig. 11 Spatial distribution of the correlation between NDVI and surface temperature by season in the arid and semi-arid regions of Northwest China from 2000 to 2020

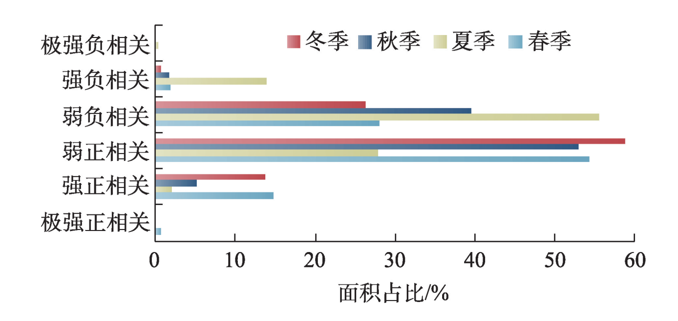


图12 2000—2020年西北干旱半干旱区各季节NDVI与地表温度相关程度面积占比

Fig. 12 Area share of NDVI in relation to surface temperature by season in the arid and semi-arid regions of Northwest China from 2000 to 2020

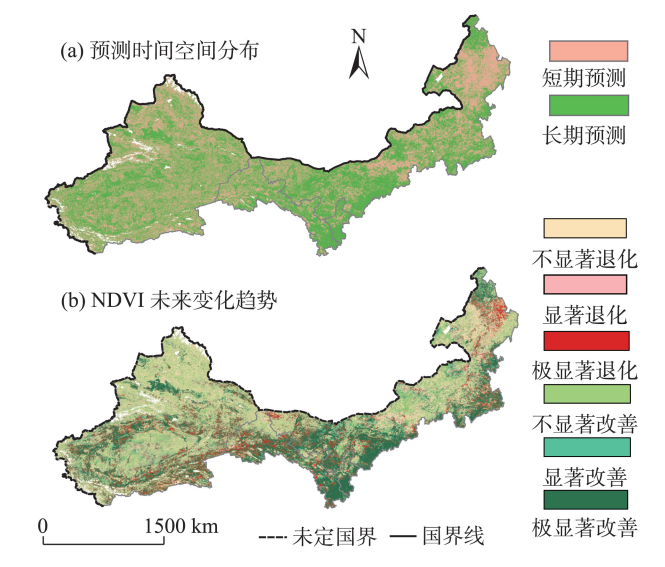


图13 2000—2020年西北干旱半干旱区NDVI未来变化趋势

Fig. 13 Future trends of NDVI in the arid and semi-arid regions of Northwest China from 2000 to 2020

表2 西北干旱半干旱地区NDVI未来变化趋势面积占比

Tab. 2 Area share of future trends in NDVI in the arid and semi-arid of Northwest China

近年NDVI变化趋势	所占面积百分比/%
极显著改善	25.05
显著改善	13.98
不显著改善	31.86
极显著退化	6.58
显著退化	5.12
不显著退化	17.41

表3 未来NDVI变化趋势预测时间长度面积占比

Tab. 3 Projected future NDVI trends as a percentage of time length area

近年NDVI变化趋势	所占面积百分比/%
短期预测	35.29
长期预测	64.71

趋势,受云雾、大气湍流、地表物质反射等影响,值会受到一定程度干扰,且无法对不同类型植被进行有效区分和分析。在未来研究中,可以采用更高分辨率的数据,剔除城市与水体的影响,结合实际情况利用NDVI与其他植被指数进行综合分析。

5 结 论

(1) 西北干旱半干旱区NDVI随季节波动较大,主要在林地(夏季NDVI高于0.8,冬季低于0.4)与耕地(夏季NDVI高于0.4,冬季低于0.2)最为明显。

(2) 西北干旱半干旱地区NDVI空间变异程度冬季偏高,且高波动主要分布在新疆与内蒙古大兴安岭地区的草地与未利用地区域。

(3) 西北干旱半干旱区NDVI改善程度逐季递减,林地改善最显著;NDVI退化主要发生在草地与未利用地区域,在新疆准噶尔盆地附近较集中。NDVI增长速率夏季($0.0059 \cdot a^{-1}$)>秋季($0.0038 \cdot a^{-1}$)>春季($0.003 \cdot a^{-1}$)>冬季($0.0019 \cdot a^{-1}$),且夏季植被长势最好,冬季植被长势最差,春、秋两季次之。

(4) 各季度NDVI受地表温度与降水量影响显著,其中,夏季地表温度与冬季降水量的逐年递增对于植被生长具有抑制作用,其余季节均为促进作用。

(5) 未来西北干旱半干旱地区NDVI以改善为主,但退化趋势面积有所增加,主要分布在新疆两盆地、内蒙古高原、呼伦贝尔高原、浑善达克沙地、大兴安岭与甘肃库姆塔格沙漠、马鬃山附近。

参考文献(References):

[1] Fabricante I, Oesterheld M, Paruelo J M. Annual and seasonal variation of NDVI explained by current and previous precipitation across Northern Patagonia[J]. Journal of Arid Environments, 2009, 73(8): 745-753

[2] 付含培, 王让虎, 王晓军. 1999—2018年黄河流域NDVI时空变化及驱动力分析[J]. 水土保持研究, 2022, 29(2): 145-153, 162. [Fu Hanpei, Wang Ranghu, Wang Xiaojun. Analysis of spatiotemporal variations and driving forces of NDVI in the Yellow River Basin during 1999-2018[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(2): 145-153, 162.]

[3] 范松克, 郝成元. 2001—2016年河南省NDVI时空变化特征分析[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(4): 860-867. [Fan Songke, Hao Chengyuan. Temporal and spatial variation analysis of NDVI in Henan from 2001 to 2016[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2019, 35(4): 860-867.]

[4] 张一然, 文小航, 罗斯琼, 等. 近20年若尔盖湿地植被覆盖变化与气候因子关系研究[J]. 高原气象, 2022, 41(2): 317-327. [Zhang Yiran, Wen Xiaohang, Luo Siqiong, et al. Study on the Relationship between vegetation cover change and climate factors in zoige wetland in recent 20 years[J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(2): 317-327.]

[5] 高娜. 中国荒漠治理的实践反思及其对生态文明建设的当代价值[D]. 延安: 延安大学, 2022. [Gao Na. Practical Reflection on Desert Governance in China and Its Contemporary Value to Ecological Civilization Construction[D]. Yan'an: Yan'an University, 2022.]

[6] 冯德乾, 王珊, 赵义民, 等. 中国森林资源变化趋势及龄组结构优化研究[J]. 西南林业大学学报: 自然科学, 2023, 43(4): 122-131. [Feng Deqian, Wang Shan, Zhao Yimin, et al. Analysis of changes in China's forest resources and age group optimization[J]. Journal of Southwest Forestry University(Natural Sciences), 2023, 43(4): 122-131.]

[7] 谢彦林. 西北干旱地区生态修复措施与对策[J]. 防护林科技, 2017, 30(7): 108-109. [Xie Yanlin. Measures and countermeasures for ecological restoration in arid areas of Northwest China[J]. Protection Forest Science and Technology, 2017, 30(7): 108-109.]

[8] 郑度. 中国西北干旱区环境问题与生态建设[J]. 河北师范大学学报: 自然科学版, 2006, 30(3): 349-352. [Zheng Du. Environmental issues and eco-reconstruction in Northwest arid region of China[J]. Journal of Hebei Normal University(Natural Science Edition), 2006, 30(3): 349-352.]

[9] 阿力木·依明, 木合塔尔·艾买提, 朱敏. 近二十年喀什地区植被覆盖的时空变化与影响因素分析[J]. 北方园艺, 2023(4): 60-70. [Alimu Yiming, Muhtar Amat, Zhu Min. Spatio-temporal variations of vegetation cover and influencing factors in Kashi Region from recent 20 years[J]. Northern Horticulture, 2023(4): 60-70.]

[10] 孙瑞, 张方敏, 翁升恒, 等. 2001—2021年中国NDVI时空格局变化及对气候的响应[J]. 中国环境科学, 2023, 43(10): 1-15. [Sun Rui, Zhang Fangmin, Weng Shengheng, et al. Spatio-temporal changes of NDVI and its response to climate in China from 2001 to 2021[J]. China Environmental Science, 2023, 43(10): 1-15.]

[11] 徐佳, 高云飞, 刘伟伟, 等. 2000—2019年青海省同仁市NDVI时空动态变化[J]. 水土保持通报, 2021, 41(5): 115-122. [Xu Jia, Gao Yunfei, Liu Weiwei, et al. Temporal and spatial dynamics of NDVI in Tongren City, Qinghai Province from 2000-2019[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(5): 115-122.]

[12] 徐勇, 郑志威, 郭振东, 等. 2000—2020年长江流域植被NDVI动态变化及影响因素探测[J]. 环境科学, 2022, 43(7): 3730-3740. [Xu Yong, Zheng Zhiwei, Guo Zhendong, et al. Dynamic variation in vegetation cover and its influencing factor detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020[J]. Environmental Science, 2022, 43(7): 3730-3740.]

[13] 邓玉娇, 王捷纯, 徐杰, 等. 广东省NDVI时空变化特征及其对气候因子的响应[J]. 生态环境学报, 2021, 30(1): 37-43. [Deng Yujiao, Wang Jiechun, Xu Jie, et al. Spatiotemporal variation of NDVI and its response to climatic factors in Guangdong Province [J]. Ecology and Environment, 2021, 30(1): 37-43.]

[14] Easdale M H, Farina C, Hara S, et al. Trend-cycles of vegetation dynamics as a tool for land degradation assessment and monitoring [J]. Ecological Indicators, 2019, 107: 105545.

[15] Sharma M, Bangotra P, Gautam A S, et al. Sensitivity of normalized difference vegetation index (NDVI) to land surface temperature, soil moisture and precipitation over district Gautam Buddh Nagar, UP, India[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2022, 36(6): 1779-1789.

[16] Moses O, Blamey R C, Reason C J C. Relationships between NDVI, river discharge and climate in the Okavango River Basin region [J]. International Journal of Climatology, 2022, 42(2): 691-713.

[17] 石淞, 李文, 曲琛, 等. 大兴安岭林草交错带植被NDVI时空演变及定量归因[J/OL]. 环境科学: 1-16[2023-11-16]. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202211190. [Shi Song, Li Wen, Qu Chen, et al. Spatiotemporal evolution and quantitative attribution analysis of vegetation NDVI in Greater Khingan Mountains forest-steppe ecotone[J/OL]. Environmental Science: 1-16[2023-11-16]. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202211190.]

[18] 陈春波, 李刚勇. 1981—2020年昆仑山-阿尔金山草地NDVI时空变化及其对气温、降水的响应[J]. 中国草地学报, 2023, 45(2): 13-25. [Chen Chunbo, Li Gangyong. Temporal and spatial variation of grassland NDVI in Kunlun Mountains, Altun Mountains and its responses to temperature and precipitation from 1981 through 2020[J]. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(2): 13-25.]

[19] 方贺, 严佩文, 石见, 等. 阿克苏地区植被生态质量时空变化及其驱动机制[J]. 干旱区研究, 2022, 39(6): 1907-1916. [Fang He, Yan Peiwen, Shi Jian, et al. Temporal and spatial variation of vegetation ecological quality and its driving mechanism in Aksu prefecture[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(6): 1907-1916.]

[20] 姚俊强, 杨青, 陈亚宁, 等. 西北干旱区气候变化及其对生态环境影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(5): 1283-1291. [Yao Junqiang, Yang Qin, Chen Yaning, et al. Climate change in arid areas of Northwest China in past 50 years and its effects on the local ecological environment[J]. Journal of Ecology, 2013, 32(5): 1283-1291.]

[21] 王玉洁. 中国西北干旱区气候变化及典型流域影响适应研究[D]. 南京: 南京大学, 2017. [Wang Yujie. Research of Climate Change in the Arid Regions of Northwest China and Its Impacts and Adaptation on Typical Basins[D]. Nanjing: Nanjing University, 2017.]

[22] 黄蕊, 徐利岗, 刘俊民. 中国西北干旱区气温时空变化特征[J]. 生态学报, 2013, 33(13): 4078-4089. [Huang Rui, Xu Ligang, Liu Junmin. Research on spatio-temporal change of temperature in the Northwest Arid Area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(13): 4078-4089.]

[23] 刘益锋, 汪小钦, 吴思颖, 等. GPM与TRMM卫星降雨数据在福建省的适用性对比分析[J]. 水土保持研究, 2019, 26(6): 311-316. [Liu Yifeng, Wang Xiaoqin, Wu Siying, et al. Comparative analysis of applicability of GPM and TRMM satellite precipitation data in Fujian Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(6): 311-316.]

[24] 李茜荣, 杨东, 冯磊, 等. 成渝经济圈2000—2018年植被NDVI的动态变化[J]. 生态学杂志, 2021, 40(9): 2967-2977. [Li Xirong, Yang Dong, Feng Lei, et al. Dynamics of vegetation NDVI in Chengdu-Chongqing Economic Circle from 2000 to 2018[J]. Journal of Ecology, 2021, 40(9): 2967-2977.]

[25] 徐光来, 杨先成, 徐晓华, 等. 气候变暖背景下安徽省月NDVI动态变化研究[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(2): 397-406. [Xu Guanglai, Yang Xiancheng, Xu Xiaohua, et al. Dynamic changes of monthly NDVI in Anhui Province under background of climate warming[J]. Resources and Environment in The Yangtze Basin, 2021, 30(2): 397-406.]

[26] 王婧姝, 毕如田, 贺鹏, 等. 气候变化下黄土高原植被生长期NDVI动态变化特征[J]. 生态学杂志, 2023, 42(1): 67-76. [Wang Jingshu, Bi Rutian, HE Peng, et al. Variations of NDVI during main growing season in the Loess Plateau under climate change[J]. Journal of Ecology, 2023, 42(1): 67-76.]

[27] Tucker C J, Newcomb W W, Los S O, et al. Mean and inter-year variation of growing-season normalized difference vegetation index for the Sahel 1981-1989[J]. International Journal of Remote Sensing, 1991, 12(6): 1133-1135.

[28] 秦格霞, 芦倩, 孟治元, 等. 1982—2015年中国北方草地NDVI时空动态及其对气候变化的响应[J]. 水土保持研究, 2021, 28(1): 101-108, 117. [Qin Gexia, Lu Qian, Meng Zhiyuan, et al. Spatial-temporal dynamics of grassland NDVI and its response to climate change in Northern China from 1982 to 2015[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(1): 101-108, 117.]

[29] 张莉, 陈芸芝, 汪小钦. 基于时序MODIS NDVI数据的长汀县植被趋势特征研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2016, 44(5): 661-667. [Zhang Li, Chen Yunzhi, Wang Xiaoqin. Vegetation trends research of Changting County based on time series of MODIS NDVI[J]. Journal of Fuzhou University(Philosophy and Social Sciences), 2016, 44(5): 661-667.]

[30] 陈文裕, 夏丽华, 徐国良, 等. 2000—2020年珠江流域NDVI动态变化及影响因素研究[J]. 生态环境学报, 2022, 31(7): 1306-1316. [Chen Wenyu, Xia Lihua, Xu Guoliang, et al. Dynamic variation of NDVI and its influencing factors in the Pearl River Basin from 2000 to 2020[J]. Ecology and Environment, 2022, 31(7): 1306-1316.]

[31] 刘子军. 基于Pearson相关系数的低渗透砂岩油藏重复压裂井优选方法[J]. 油气地质与采收率, 2022, 29(2): 140-144. [Liu Zijun. Method for selecting repeated fracturing wells in low-permea-

bility sandstone reservoirs based on Pearson correlation coefficient [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(2): 140–144.]

[32] Coscia M. Pearson correlations on complex networks[J]. Journal of Complex Networks, 2021, 9(6): cnab036.

[33] Hurst H E. The problem of long-term storage in reservoirs[J]. International Association of Scientific Hydrology Bulletin, 1956, 1(3): 13–27.

[34] 程丌杰, 孟妮娜, 蔡昕楠, 等. 陕西省NDVI时空变化及其对气候和人类活动的响应[J]. 人民黄河, 2023, 45(4): 28–34. [Cheng Wujie, Meng Nina, Cai Xinnan, et al. Temporal and spatial variation of NDVI in Shaanxi Province and its response to climate change and human activities[J]. Yellow River, 2023, 45(4): 28–34.]

[35] 袁全勇, 杨阳, 李春, 等. 基于Hurst指数的风速时间序列研究[J]. 应用数学和力学, 2018, 39(7): 798–810. [Yuan Quanyong, Yang Yang, Li Chun, et al. Research of wind speed time series based on the Hurst exponent[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2018, 39(7): 798–810.]

[36] Jiang L, Liu Y, Wu S, et al. Analyzing ecological environment change and associated driving factors in China based on NDVI time series data[J]. Ecological Indicators, 2021, 129: 107933.

[37] 马小梅, 杜秉晨曦, 程勇翔, 等. 准噶尔盆地植被变化趋势及相关因素分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1401–1410. [Ma Xiaomei, Du Bingchenxi, Cheng Yongxiang, et al. Analysis of vegetation variation trend and correlative factors in Junggar Basin[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(5): 1401–1410.]

[38] 焦阿永, 陈伏龙, 闫俊杰, 等. 北疆地区草地TI-NDVI与NDVImax时空异质性评价[J]. 干旱区研究, 2022, 39(4): 1155–1165. [Jiao Ayong, Chen Fulong, Yan Junjie, et al. Spatio-temporal heterogeneity evaluation of grassland TI- NDVI and NDVImax in northern Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(4): 1155–1165.]

[39] 张兴龙, 何明. 西北干旱半干旱地区抗旱造林技术[J]. 乡村科技, 2019(5): 70, 72. [Zhang Xinglong, He Ming. Drought-resistant afforestation technology in arid and semi-arid regions of Northwest China[J]. Rural Science & Technology, 2019(5): 70, 72.]

[40] 韩刚, 韩恩贤. 我国西北干旱半干旱地区抗旱造林技术[J]. 林业实用技术, 2010(8): 11–13. [Han Gang, Han Enxian. Drought resistant afforestation techniques in arid and semi-arid areas of Northwest China[J]. Practical Forestry Technology, 2010(8): 11–13.]

[41] Liu Ke, Du Lingtong, Hou Jing, et al. Spatiotemporal variations of NDVI in terrestrial ecosystems in China from 1982–2012[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(6): 1885–1896.

[42] 文妙霞, 何学高, 刘欢, 等. 基于地理探测器的宁夏草地植被覆被时空分异及驱动因子[J]. 干旱区研究, 2023, 40(8): 1322–1332. [Wen Miaoxia, He Xuegao, Liu Huan, et al. Analysis of the spatiotemporal variation characteristics and driving factors of grassland vefetation cover in Ningxia based on geographical detectors[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(8): 1322–1332.]

[43] 周贵臣. 干旱半干旱地区抗旱造林技术的研究[J]. 农业与技术, 2017, 37(20): 186–186. [Zhou Guichen. Research on drought-resistant afforestation technology in arid and semi-arid areas[J]. Agriculture and Technology, 2017, 37(20): 186–186.]

[44] 唐希明. 刍议我国西北干旱地区的抗旱造林技术[J]. 福建农业, 2014(9): 164. [Tang Ximing. Ruminating on drought-resistant afforestation techniques in arid areas of Northwest China[J]. Fujian Agriculture, 2014(9): 164.]

Seasonal changes of NDVI in the arid and semi-arid regions of Northwest China and its influencing factors

WU Wanmin[1], LIU Tao[2], CHEN Xin[2]

(1. School of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, Sichuan, China; 2. Department of Earth System Science, Center for Global Change Research, Tsinghua University, Key Laboratory of Earth System Simulation, Ministry of Education, Beijing 100084, China)

Abstract: The study of vegetation dynamics and its influencing factors can reveal the response mechanism between vegetation cover dynamics and climate change and has important significance for regional vegetation restoration and ecological sustainability. Based on MODIS multitemporal remote sensing satellite data, this study investigated the quarterly changes in vegetation cover in the arid and semi-arid regions of Northwest China from 2000−2020 using variation coefficient, Theil-Sen median trend analysis, Mann-Kendall significance test, correlation analysis, and Hurst index. The study found that: (1) The spatial variability of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was high in winters, and the high fluctuation areas were mainly in the grasslands and unused land areas in the Daxinganling region of Xinjiang and Inner Mongolia. (2) NDVI fluctuates more with the seasons and is most obvious in forests and cultivated areas. (3) NDVI is mainly improving, with the largest improvement in springs (84.63%), the smallest in winters (72.52%), and the most significant improvement in the woodland areas. (4) Surface temperature and precipitation influenced NDVI in all seasons (Significance = 0.05), with precipitation changes significantly affecting NDVI trends in summers and weakly during winters and surface temperature changes significantly affecting NDVI trends in springs and weakly in autumns. (5) The future NDVI also mainly shows an improving trend, with an area of 70.89%; notably, the degraded areas are sporadically distributed in the Tarim and Junggar Basins of Xinjiang. This study's results provide theoretical references for ecological restoration and management in the arid and semi-arid regions of Northwest China and the response to local climate warming and humidification.

Keywords: NDVI; trends in vegetation cover; influencing factors; MODIS; future projections; arid and semi-arid region; Northwest China